

Primljen / Received: 23.9.2015.

Ispravljen / Corrected: 16.12.2015.

Prihvaćen / Accepted: 26.1.2016.

Dostupno online / Available online: 10.3.2016.

# Analiza morfodinamičke stabilnosti poprečnog profila šljunčane plaže

## Autori:



<sup>1</sup>Izv.prof.dr.sc. **Goran Lončar**  
[goran.loncar@grad.hr](mailto:goran.loncar@grad.hr)



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Dalibor Carević**  
[car@grad.hr](mailto:car@grad.hr)



<sup>1</sup>Doc.dr.sc. **Damir Bekić**  
[damir.bekic@grad.hr](mailto:damir.bekic@grad.hr)



<sup>1</sup>**Maria Babić**, univ. bacc. ing. aedif.  
[maria.babic@student.grad.hr](mailto:maria.babic@student.grad.hr)



<sup>1</sup>**Nina Grbić**, univ. bacc. ing. aedif.  
[nina.grbic@student.grad.hr](mailto:nina.grbic@student.grad.hr)



<sup>1</sup>**Vjera Pranjić**, univ. bacc. ing. aedif.  
[vjera.pranjic@student.grad.hr](mailto:vjera.pranjic@student.grad.hr)

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
Zavod za hidrotehniku

Pregledni rad

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić, Maria Babić, Nina Grbić, Vjera Pranjić**

## Analiza morfodinamičke stabilnosti poprečnog profila šljunčane plaže

U radu je opisana analiza stabilnosti šljunčanih plaža i razvoj njihovog profila u poprečnom smjeru pri djelovanju gravitacijskih vjetrovnih valova. Analiza je provedena tehnikom numeričkog modeliranja. Modelski pristup primijenjen je i u analizi valnih deformacija i morfodinamike na primjeru šljunčane plaže Medveja. Rezultantni modelski profili plaže koreliraju s izmjerenim poprečnim profilima plaže Medveja, pa se metodologija i dobivena procjena erozije materijala plaže mogu praktično primijeniti pri donošenju odluka u raznim fazama projektiranja.

### Ključne riječi:

numerički model, šljunčana plaža, vjetrovni valovi, erozija materijala plaže

Subject review

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić, Maria Babić, Nina Grbić, Vjera Pranjić**

## A morphodynamic stability analysis of gravel beach cross-section by 1D numerical model

A stability analysis of gravel beaches, and development of their cross-sectional profiles under the action of gravitational wind waves, is described in the paper. The analysis was conducted using the numerical modelling technique. The modelling approach was also applied in the analysis of wave deformations and morphodynamics on the example of a gravel beach in Medveja. The designed beach cross-sections correlate well with the measured Medveja beach cross-sections, and so the methodology and the beach material erosion estimate can be applied in practice when making decisions at various design stages.

### Key words:

numerical model, gravel beach, wind waves, beach material erosion

Übersichtsarbeit

**Goran Lončar, Dalibor Carević, Damir Bekić, Maria Babić, Nina Grbić, Vjera Pranjić**

## Analyse der morphodynamischen Stabilität des Querschnittsprofils von Kiesstränden

In dieser Arbeit werden Stabilitätsanalysen von Kiesstränden und die Entstehung ihrer Querschnittsprofile unter Einwirkung durch Wind entstehender Gravitationswellen beschrieben. Die Analyse wurde mittels numerischer Modellierung durchgeführt. Dieser Modellansatz wurde auch bei der Analyse der Wellendeformationen und des morphodynamischen Verhaltens am Beispiel der Querschnittsprofile des Strandes Medveja angewandt. Die resultierenden Modellprofile des Strandes Medveja korrelieren mit den aus Messungen ermittelten Querschnittsprofilen. Somit können die Methodologie und die resultierende Bewertung der Strandmaterialerosion bei Entscheidungen in verschiedenen Planungsphasen praktisch angewandt werden.

### Schlüsselwörter:

numerisches Modell, Kiesstrand, Windwellen, Erosion von Strandmaterial

## 1. Uvod

Plaže sadrže veliku ekološku i ekonomsku vrijednost te se učestalo njima koristi u svrhu rekreacije i boravka. U zadnja dva desetljeća bilježi se trend proširenja postojećih plažnih kapaciteta. Za racionalno rješavanje ovog izazova potrebno je odabrati hidrodinamički povoljne pozicije te izvršiti adekvatan izbor materijala za nasipavanje. Lošim izborom dovodi se do materijalnih šteta (odnošenje nasipnog materijala u dubinu) te degradacije krajobraza i biocenoze morskog dna. Kategorija šljunčanih žala podrazumijeva prevladavanje šljunkovitog sedimenta koji je po standardiziranoj Udden-Wentworth klasifikaciji definiran rasponom promjera zrna od 2 do 64 mm. Pojava novih tehnologija poput optičkih mjerenja te primjena nove generacije kamera i akustičnih uređaja otvorila je mogućnost razvoju laboratorijskog i *in situ* istraživanja ponašanja plaža u raznim okolišnim uvjetima. Paralelno s time uspostavljaju se i novi modeli morfodinamike šljunčanih plaža [1]. Prijašnja istraživanja koncentrirala su se uglavnom na dugoročne morfološke promjene profila plaža [2-4], dok je sveobuhvatnije istraživanje kratkoročnih promjena profila plaža postala predmetom istraživanja tek u nedavnom razdoblju [5-7].

Interakcija valova i plaže u zoni obalne crte kompleksan je hidrodinamički proces, posebice ako poprečni profil plaže pretežno čini šljunak [8]. Tijekom vremena, a počev od inicijalne uspostave profila plaže nasipavanjem s konstantnim nagibom lica plaže (antropogeni udio), morfološke pojave se očituju kroz poprečnu promjenu kota plaže/podmorja kao posljedice erozije i sedimentacije. Erozijsko djelovanje (odnošenje materijala) pojavljuje se uglavnom u zoni svoša vala s intenzitetom ovisnim o učestalosti pojedinih incidentnih valnih spektara tijekom promatranog razdoblja [9]. Erodირani materijal se "odvlači" u veće dubine, gdje se sedimentira i kao takav predstavlja gubitak-trošak nasipnog materijala plaže. Kod prirodno uravnoteženih poprečnih profila plaže/podmorja nakon ekscenčnih situacija valovanja nastupaju i razdoblja s umjerenijom valnom klimom u kojima se prethodno sedimentirani materijal ponovno izvlači na lice plaže. Ravnotežni poprečni profil podmorskog dijela plaže pokušao se opisati empirijskim izrazima [10-12] u kojima se aproksimativno definira odnos promjena dubina (kote dna) s povećanjem udaljenosti od obale.

Empirijski obrasci ravnotežnih profila [10-12] oslanjaju se samo na jedan ulazni podatak, promjer zrna plažnog materijala. Usporedba rezultata dobivenih takvih izraza sa stvarnim-izmjenjenim profilima šljunčanih plaža i podmorja u prirodi upućuje na veliku nepouzdanost primjene empirijskih formula [13-15], osim u slučaju izrazito homogenih okolišnih uvjeta i velikih troškova istražnih radova [16]. Osim toga, empirijski izrazi definiraju ravnotežni poprečni profil u eksponencijalnoj formi, što u praksi zasigurno ne predstavlja racionalan način izvedbe. Prema našim spoznajama, u literaturi ne postoje materijali i/ili podloge koje sistematiziraju odnose intenziteta morfoloških promjena (erozija i sedimentacija u poprečnom profilu plaže) i

okolišnih-vanjskih uvjeta (valna klima). Zbog toga projektanti pri donošenju odluke o izboru reprezentativnog zrna nasipnog materijala i odgovarajućeg nagiba lica plaže/podmorja nisu u mogućnosti pouzdano i brzo procijeniti troškove varijantnih rješenja planiranog zahvata.

U ovom radu prikazani su rezultati numeričkog modeliranja morfoloških promjena profila šljunčane plaže u rasponu realnih okolišnih uvjeta. Kao konačni rezultat prikazani su dijagrami temeljem kojih se jednostavno određuje količina erodiranog materijala plaže u ovisnosti o prevladavajućim valnim uvjetima, inicijalno odabranom nagibu plaže i granulaciji nasipnog materijala.

Varijacijom relevantnih parametara u sklopu provedbe istraživanja obuhvaćene su sljedeće situacije: promjer zrna plažnog materijala  $d_{50} = 10, 20, 30$  mm, dubokovodne značajne valne visine  $H_s = 0,7; 1; 1,5; 2$  m, strmost valova  $I_w = 1:12, 1:15, 1:20, 1:25$ , inicijalna strmost plaže  $I_b = 1:4, 1:6, 1:8, 1:10$ . U svim analizama korišteni su JONSWAP valni spektri s parametrizacijom  $g = 3,3$ . Prezentirani rezultati morfoloških promjena dani su za situacije kontinuiranog valovanja od 3 h i 12 h.

Osim provedbe navedenih parametarskih analiza, numeričkim modelom je praćen i razvoj jednog poprečnog profila na plaži Medveja u realnim uvjetima valovanja. Validacija provedenih numeričkih simulacija izvršena je temeljem usporedbe s izmjerenim profilima.

Potrebno je naglasiti da tijekom djelovanja vala na zrnate plaže istovremeno postoje dva glavna procesa: odvlačenje plažnog materijala u dublju zonu i naguravanje materijala na obalu. Ti procesi se događaju u pravcu djelovanja vala, odnosno u smjeru incidentnih valova i suprotno od njega. Time se stvara dvodimenzionalno kretanje plažnog materijala (uzduž plaže i poprečno na nju). U pravilu se ti procesi degradiranja plaže uvijek događaju pod nekim kutom u odnosu na obalu, a u karakterističnom hrvatskom priobalju vrlo su rijetke situacije kada valovi dolaze okomito na duži potez obalne linije. U ovom se radu analiza stabilnosti plažnog materijala provodi samo za jedan poprečni profil plaže koji koincidira sa smjerom incidentnih valova. Stoga je analiza provedena samo za poprečnu komponentu gibanja plažnog materijala, uz zanemarivanje uzdužne komponente generirane nailaskom incidentnih valova na plažu pod kutom.

## 2. Numerički model

Ako je dominantna fizika procesa prepoznata i uvedena u procesno orijentirani numerički model, takav se model može primijeniti univerzalno. Time numerički model predstavlja unaprijeđenje u odnosu na empirijske modele. U novije vrijeme najviše je pozornosti usmjereno na razvoj modela koji analiziraju dinamiku vala na licu plaže od piješčanog materijala [17, 18] (raspon promjera zrna  $d = 0,06$  mm - 2 mm). S druge strane, relativno malo modela se razvija za analizu morfodinamike plaže s mješovitim ili pretežito šljunčanim materijalom [19-21].

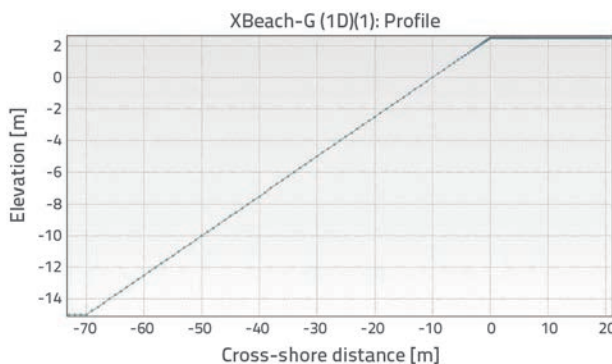
Razlog tomu je i relativno ograničena baza podataka dobivenih mjerenjem u prirodi i laboratorijskim uvjetima, a koji su potrebni za verifikaciju modelske parametrizacije i modelskih rezultata. U ovom radu korišten je "open-source" model XBeach-G (<http://oss.deltares.nl>) kojim se rješava morfodinamika poprečnog profila šljunčanih plaža uslijed djelovanja vjetrovnih valova u prijelaznom i plitkovodnom području. Procesi infiltracije i eksfiltracije mora u tijelu i iz tijela šljunčane plaže, pri penjanju vala uzduž lica plaže, obuhvaćeni su primjenom novorazvijenog modela interakcije površinskog i potpovršinskog toka [22]. Ovaj interakcijski proces ima mnogo veće značenje u slučaju šljunčanih plaža u odnosu na pješčane plaže [23]. Interakcijski procesi površinskog i potpovršinskog toka u modelu se proračunavaju kroz jedan vertikalni sloj. Iako su jednačbe usrednjene za vertikalni smjer, dva kvazi 3D modela se paralelno koriste za potrebe proračuna vertikalne raspodjele brzina i tlakova na površini i na dnu površinske vode i stupca podzemne vode (nehidrostatska aproksimacija raspodjele tlakova). Za detaljnije objašnjenje matematičke osnove korištenog numeričkog modela čitatelj se upućuje na radove [17, 22, 23].

Površinski tok je razlučen rješavanjem *predictor-corrector* numeričke sheme [24]. Shema ima karakteristike točnosti drugog reda u zoni glatkog rješenja i prvog reda u području diskontinuiteta [25]. Shema je konzervativna kad je riječ o očuvanju mase i količine gibanja [26], a time je omogućena točna prezentacija sušenja i potapanja numeričkih čvorova te kritičnog i silovitog strujanja. Potpovršinski tok se rješava centralnim diferencijama prvog reda. Proračun količine gibanja u horizontalnom smjeru na prostornoj skali manjoj od prostornog inkrementa proračunske mreže oslanja se na Smagorinsky model horizontalne viskoznosti [27]. Za proračun gradijenta tlaka u vertikalnom smjeru primijenjena je Keller-Boxova metoda [28]. Potpovršinski tok u horizontalnom smjeru tretiran je Darcyjevim zakonom uz dodatnu prilagodbu za turbulentni režim strujanja [29]. Kako bi se izračunala nehidrostatska raspodjela tlakova u potpovršinskom toku, piezometarska razina je aproksimirana parabolom u vertikalnom smjeru, uz rubni uvjet na dnu izražen vertikalnom brzinom 0, nametnutu razinu slobodnog vodnog lica i konstantan gradijent brzina uzduž vertikale [15]. Infiltracija i eksfiltracija se zbivaju na mjestu gdje površinska i potpovršinska voda nisu u kontaktu. Stoga infiltracija nastupa na mjestu gdje površinski tok pokriva područje s nižom razinom podzemne vode od razine pokosa (dna), pri čemu perkolacija površinske vode u potpovršinski sloj ovisi o gradijentu tlaka uzduž fronte vlaženja [30].

Primjenjeni numerički model (Xbeach-G) verificiran je na osnovi istraživanja na fizikalnom modelu malog mjerila [21] i detaljnih *in situ* istraživanja i podataka dobivenih daljinskom detekcijom za nekoliko engleskih šljunčanih plaža uzduž obalne crte [7].

U numeričkim modelskim analizama korištene su značajne valne visine  $H_s = 0,7; 1; 1,5; 2$  m uz pripadne vršne valne periode  $T_p$  pomoću kojih se postižu željene strmosti vala 1:12, 1:15, 1:20, 1:25 (tablica 1.). Valne duljine definirane su za dubokovodne uvjete  $L_s = gT_s^2/(2\pi)$ , pri čemu je odnos značajnih

i vršnih valnih perioda definiran odnosom  $T_s = T_p = T_s \cdot 1,05$  [31]. Korišteni su JONSWAP valni spektri s parametrizacijom  $g = 3,3$ . U parametrizaciji modela podzemnog toka za koeficijente propusnosti  $k$  usvojene su vrijednosti predočene u [32], a vezano na promjer zrna plažnog materijala ( $d_{50} = 10$  mm  $\rightarrow k = 0,15$  m/s,  $d_{50} = 20$  mm  $\rightarrow k = 0,65$  m/s,  $d_{50} = 30$  mm  $\rightarrow k = 1,8$  m/s.). U modulu za proračun morfoloških promjena usvojene su sljedeće vrijednosti: Shieldov bezdimenzijski koeficijent trenja sedimenta 0,025, fazni pomak u Nielsenovom graničnom sloju  $25^\circ$ , kut unutarnjeg trenja  $35^\circ$ .



Slika 1. Diskretizacija 1D domene numeričkog modela s varijabilnim korakom između proračunskih čvorova (inicijalni nagib plaže 1:4)

Tablica 1. Analizirane značajne valne visine  $H_s$  s pripadnim vršnim valnim periodima  $T_p$  (pomoću kojih se postižu usvojene strmosti vala 1:12, 1:15, 1:20, 1:25)

	dubokovodna strmost vala					dubokovodna strmost vala			
	1:12	1:15	1:20	1:25		1:12	1:15	1:20	1:25
$H_s$	dubokovodni $L_s$ [m]				$H_s$	dubokovodni $T_p = T_s \cdot 1,05$ [s]			
0,7	8,4	10,5	14	17,5	0,7	2,4	2,7	3,1	3,5
1	12	15	20	25	1	2,9	3,3	3,8	4,2
1,5	18	22,5	30	37,5	1,5	3,6	4,0	4,6	5,1
2	24	30	40	50	2	4,1	4,6	5,3	5,9

### 3. Empirijski modeli

Empirijski model ravnotežnog poprečnog profila dna predočen je u radovima [10, 11] te se odnosi samo na promjer sedimenta  $d_{50}$  u jednostavnoj analitičkoj formi  $h(y) = A(d) y^{2/3}$ , pri čemu je  $y$  horizontalna udaljenost u poprečnom smjeru i u razini mirne razi, a  $A(d)$  empirijski parametar definiran odnosom  $A(d) = 0,067 d_{50}^{0,44}$ . Na slici 2. prikazani su ravnotežni profili za granulacije sedimenta  $d_{50} = 10, 20$  i  $30$  mm.

Za procjenu "oštećene-erodirane" površine šljunčane plaže (materijal odnesen u dubinu) uslijed djelovanja valova Van der Meer je predložio empirijski model definiran izrazom (1) [12]:

Tablica 2. Vrijednosti erodirane površine  $A$  prema empirijskom modelu [12] za analizirane raspone značajnih valnih visina, strmosti vala, nagiba lica plaže i dna, uz usvojene vrijednosti parametara  $\rho_s, \rho_M, N, P$  i  $d_{50} = 10$  mm

$I_W = 1:12 ; d_{50} = 10$ mm																
$H_s$ [m]	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2
$I_B$	1:4	1:4	1:4	1:4	1:6	1:6	1:6	1:6	1:8	1:8	1:8	1:8	1:10	1:10	1:10	1:10
$A$ [m <sup>2</sup> ]	5,6	33,3	253	1066	2,0	11,7	89,1	375	1,0	5,7	43,0	181	0,5	3,2	24,5	103
$I_W = 1:15 ; d_{50} = 10$ mm																
$H_s$ [m]	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2
$I_B$	1:4	1:4	1:4	1:4	1:6	1:6	1:6	1:6	1:8	1:8	1:8	1:8	1:10	1:10	1:10	1:10
$A$ [m <sup>2</sup> ]	7,4	44,0	334	1409	2,6	15,5	117	496	1,3	7,5	56,8	239	0,7	4,3	32,4	136
$I_W = 1:20 ; d_{50} = 10$ mm																
$H_s$ [m]	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2
$I_B$	1:4	1:4	1:4	1:4	1:6	1:6	1:6	1:6	1:8	1:8	1:8	1:8	1:10	1:10	1:10	1:10
$A$ [m <sup>2</sup> ]	10,6	63,1	479	2018	3,7	22,2	168	711	1,8	10,7	81,4	343	1,0	6,1	46,4	195
$I_W = 1:25 ; d_{50} = 10$ mm																
$H_s$ [m]	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2	0,7	1	1,5	2
$I_B$	1:4	1:4	1:4	1:4	1:6	1:6	1:6	1:6	1:8	1:8	1:8	1:8	1:10	1:10	1:10	1:10
$A$ [m <sup>2</sup> ]	14,0	83,4	633	2668	4,9	29,4	223	940	2,4	14,2	107	453	1,4	8,1	61,3	258

$$A = \frac{H_s^5}{9161,3 \Delta^5 d^3 P^{0,9} N^{-0,5} \xi^{-2,5}} \quad (1)$$

gdje je:

$A$  - erodirana površina poprečnog profila

$H_s$  - značajna valna visina

$d$  - promjer zrna

$\rho_s$  - gustoća zrna šljunka (usvojeno 2600 kg/m<sup>3</sup>)

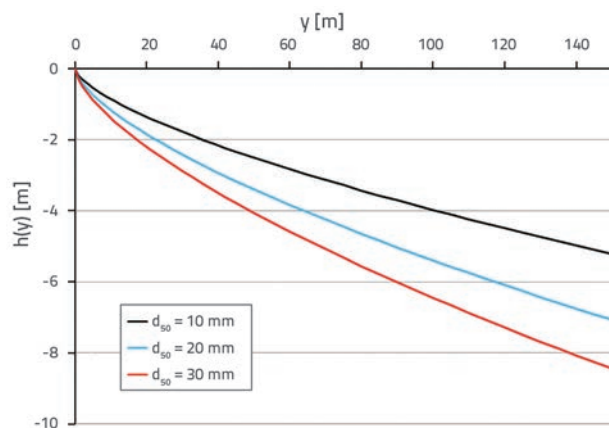
$\rho_M$  - gustoća mora (usvojeno 1028 kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta$  - relativna gustoća =  $(\rho_s / \rho_M) - 1$

$N$  - broj valova (usvojeno 7500)

$P$  - nazivna propusnost (usvojeno 30 %)

$\xi$  - Iribarrenov broj,  $\xi = \tan \alpha / s^{0,5}$  ( $\tan \alpha$  - nagib plaže,  $s$  - strmost vala,  $s = H_s / L_s$ )



Slika 2. Ravnotežni poprečni profili dna za granulaciju sedimenta  $d_{50} = 10, 20$  i  $30$  mm prema [10, 11]

U tablici 2. prikazane su vrijednosti erodirane površine  $A$  za analizirane raspone značajnih valnih visina, strmosti vala, nagiba lica plaže i dna, uz prethodno navedene usvojene vrijednosti parametara  $\rho_s, \rho_M, N, P$  i  $d = d_{50} = 10$  mm. Empirijski modeli koje su prikazali autori u [10-12] primijenit će se i u ovom radu za usporedbu s rezultatima numeričkog modela.

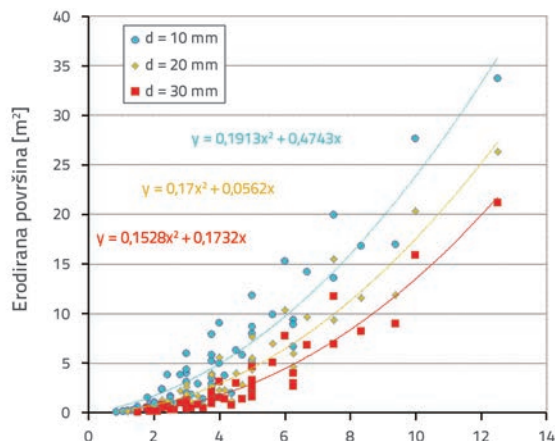
#### 4. Intenzitet erozije/sedimentacije u širem rasponu okolišnih uvjeta

Na slikama 3. i 4. prikazani su odnosi volumena materijala plaže odnesenog u dubinu (erozija, ekonomski gledano - trošak) i ulaznih parametara proračuna  $H_s, I_B, I_W, d_{50}$  s numeričkim modelom XBeach-G. Erodirani volumen odnosi se na jedan metar širine plaže (umnožak erodirane površine i jednog metra širine plaže). Na slici 3. objedinjeni su svi rezultati numeričkih proračuna, a prikazana su i tri interpolacijska polinoma pomoću kojih se može direktno izračunati erodirana površina, odnosno volumen. Potrebno je napomenuti da rezultati dobiveni interpolacijskim polinomima imaju srednje pogreške (AE) +0,15 m ( $d = 10$  mm), +0,05 m ( $d = 20$  mm) i +0,01 m ( $d = 30$  mm), te korijene srednje kvadratne pogreške (RMSE), 2,0 ( $d = 10$  mm), 1,61 ( $d = 20$  mm) i 1,24 ( $d = 30$  mm) u odnosu na pojedinačno izračunane vrijednosti pomoću numeričkog modela XBeach-G. Slika 4. daje detaljniji uvid u odnose  $eroded\ area = f(H_s, I_B, I_W, d_{50})$  te bolje odgovara potrebama praktične primjene. Slike prikazuju situacije nakon 12 sati valovanja pri konstantnoj srednjoj morskoj razi.

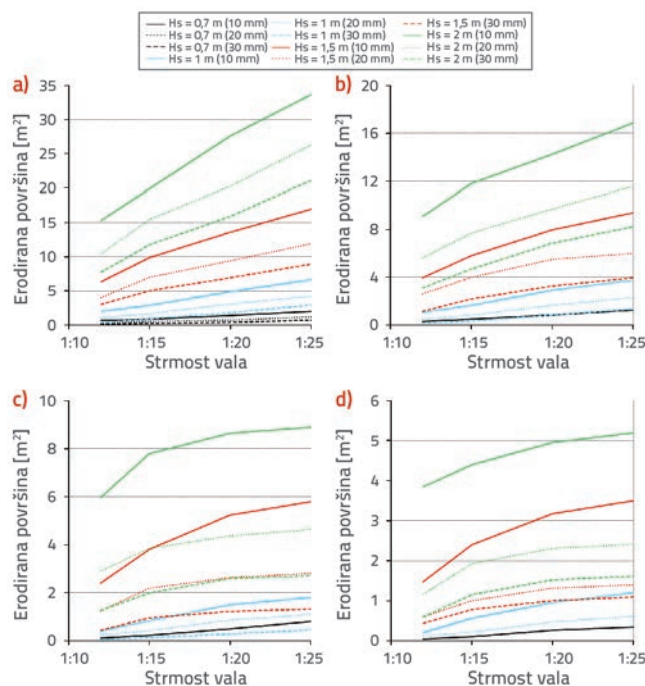
Usporedba dobivenih vrijednosti s rezultatima prikazanim u tablici 2. pokazuje da su višestruko precijenjeni volumeni erozije u empirijskom izrazu (1), pri čemu povećanje strmosti valova i valnih visina doprinosi povećanju razlike. Ta razlika ne treba



čuditi jer je izraz (1) dobiven temeljem mjerenja erozije primarne školjere lukobranskih konstrukcija na fizikalnom modelu i u prirodi, gdje su promjeri zrna za jedan do dva reda veličine veći od promjera zrna šljunčanog materijala plaže.



Slika 3. Izračunani volumeni (površina x 1m' plaže) erodiranog materijala plaže pri varijaciji ulaznih parametara proračuna  $H_s$ ,  $I_B$ ,  $I_W$ ,  $d_{50}$  (model XBeach-G) s pripadnim interpolacijskim polinomima



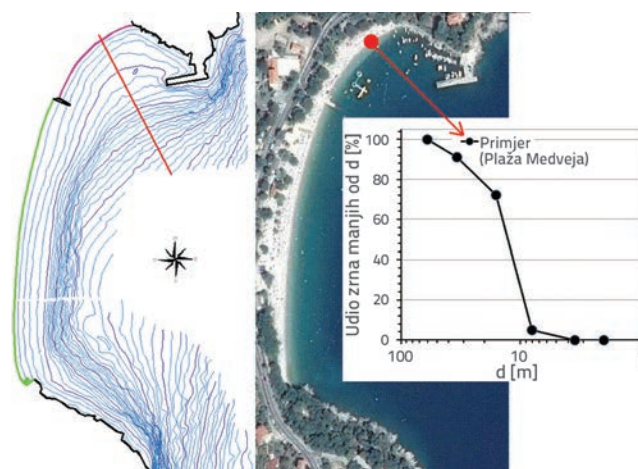
Slika 4. Volumen (površina x 1m' plaže) erodiranog materijala plaže u ovisnosti o ulaznim parametrima proračuna  $H_s$ ,  $I_B$ ,  $I_W$ ,  $d_{50}$  numeričkim modelom XBeach-G: a)  $I_B = 4$ ; b)  $I_B = 6$ ; c)  $I_B = 8$ ; d)  $I_B = 10$

## 5. Procjena u realnim uvjetima (primjer šljunčane plaža Medveja)

Geodetski situacijski nacrt uvala Medveja izrađen je početkom prosinca 2013. godine (slika 5.). Na slici 5. je prikazana i pozicija

uzorkovanja materijala plaže (10. svibnja 2015.). Laboratorijskim ispitivanjem granulometrijskog sastava plažnog materijala dobiven je  $d_{50} = 14,5$  mm (promjer zrna 50-postotnog udjela iz granulometrijske krivulje ispitanog uzorka).

Anketom na terenu te razgovorom s nadležnim osobljem za održavanje plaže dobivene su informacije o primijećenoj općenitoj dinamici plažnog materijala. Na središnjem i južnom dijelu plaže (slika 5., zelena linija) primijećen je izraženiji uzdužni (eng. *long-shore*) pronos materijala pri djelovanju većih valova, dok se u uvjetima blažeg valovanja iz raspona incidentnih smjerova ENE-SSE plaža "oporavlja". S druge strane, sjeverni dio plaže (slika 5., svjetlocrvena boja) pokazuje značajniju sklonost prema poprečnom (eng. *cross-shore*) prenosu, i to samo u uvjetima valova generiranih vjetrovima juga. Za vrijeme jačih nevremena i izraženijeg valovanja iz smjera juga dolazi do uočljivih promjena uzduž analiziranog profila (slika 5.).

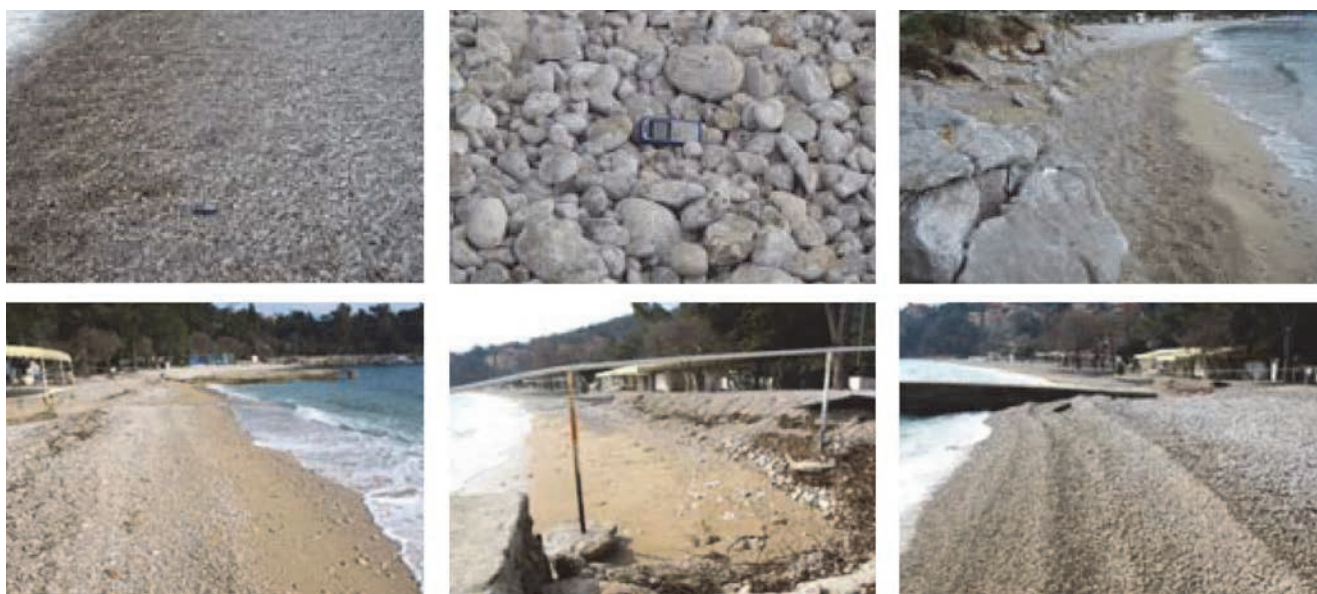


Slika 5. Izobate u akvatoriju uvala Medveja (korak dubine 1m), pozicija uzorkovanja materijala plaže i rezultati granulometrijskog sastava

Također je uočeno da se najintenzivnija erozija pojavljuje u zoni mirne morske razi. Ako je razdoblje blage valne klime između dva nevremena dovoljno dugo, poprečni profil ponovno poprima prvobitnu "ravnotežnu" formu. Stoga se pretpostavlja da profil plaže izmjeren 23. prosinca 2013. (slika 5.) predstavlja karakterističnu situaciju nakon dužeg razdoblja blage valne klime, odnosno duže odsutnosti intenzivnog valovanja južnih incidentnih smjerova.

U prethodnom razdoblju velika je bujica omogućavala prirodno donošenje veće količine kamenog materijala na plažu medveja. Raznom izgradnjom taj donos je bitno smanjen. Nanos, koji je različite krupnoće, valovi raspoređuju po plaži prema svojoj snazi (slika 6., stanje u listopadu 2010.).

Na slici 6. prikazano je i stanje na plaži Medveja u veljači 2011., nakon nekoliko nevera. Razvidno je odnošenje materijala plaže u dubinu. Naknadno uređenje i prihrana napravljena je dovozom veće količine drobljenca.



Slika 6. Različita krupnoća nanosa koji valovi raspoređuju po plaži primjereno je njihovoj snazi (gore, listopad 2010.) i stanje u veljači 2011., nakon nekoliko nevra (dolje)

Kako bi se provjerila mogućnost praktične primjene dosadašnjih rezultata, provedena je analiza s nekoliko koraka-faza numeričkog modeliranja. Prvotno je uspostavljen numerički model valnog generiranja i valnih deformacija za cijeli jadranski bazen (slika 7., regionalni model), te je njime analizirana prostorno-vremenska razdioba značajnih valnih visina  $H_s$  i vršnih perioda  $T_p$ . Iz cjelokupnog simulacijskog razdoblja (2013. godina) odabrane su prema redoslijedu situacije s pragom prekoračenja  $H_s > 0,2$  m,  $T_p > 2,7$  i rasponom incidentnih smjerova ESE ( $112,5^\circ$ ) - S ( $180^\circ$ ) ispred uvale Medveja. Budući da je u prostornoj domeni regionalnog modela korištena pregruba proračunska mreža za razlučivanje relevantnih valnih deformacija (oplićavanje, refrakcija, difrakcija) na prostornoj skali same uvale, uspostavljen je i lokalni numerički model (slika 7., lokalni model). Sve izdvojene situacije ponovno su prema redoslijedu analizirane lokalnim modelom, uz rubne uvjete ( $H_s$ ,  $T_p$  incidentni smjer valovanja) dobivene iz rezultata regionalnog modela. Nadalje, lokalnim modelom su praćene valne deformacije do početne točke profila na izobati -10 m (slika 5.), a time su dobivene i potrebne ulazne informacije (rubni uvjeti) za numerički model morfoloških promjena uzduž analiziranog profila.

Zaključno je proveden numerički proračun erozije/sedimentacije uzduž analiziranog profila (slika 5.) u "realnim" dinamičkim uvjetima valovanja (nestacionarni rubni uvjeti  $H_s$ ,  $T_p$ ), te usporedba s rezultatima proračuna oslonjenog na direktnu primjenu dijagrama erozije/sedimentacije za širi raspon okolišnih uvjeta (slika 4.).

### 5.1. Regionalni i lokalni model valnog generiranja i valnih deformacija

Na slici 7. prikazano je područje obuhvaćeno prostornim domenama numeričkog modela valnog generiranja i valnih

deformacija (regionalanli model i lokalni model). Na slici je prikazana i primijenjena modelska diskretizacija s konačnim volumenima. Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište površine svakog konačnog volumena, varijabilna je i proteže se od 8000 (12) m u dubokovodnom području do 250 (2) m u zoni same obalne crte. U zagradi su dane vrijednosti za proračunsku mrežu lokalnog modela.

Budući da su za validaciju numeričkog modela valnog generiranja na raspolaganju bili podaci mjerenja na valografu smještenom u području otvorenog mora, kao i podaci u blizini plaže Medveja, prostorna domena regionalnog modela uspostavljena je za područje cijelog jadranskog bazena. Ipak, potrebno je napomenuti da je predmetna lokacija plaže izložena primarno vjetrovnim valovima koji se generiraju u relativno zatvorenom akvatoriju, uslijed puhanja vjeta s lokalnim obilježjima.

Za provedbu numeričkih analiza primijenjen je spektralni numerički model Mike 21sw ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)), kojim je omogućena simulacija generiranja, deformacija i zamiranja gravitacijskih vjetrovnih valova i valova mrtvog mora u području otvorenog mora i priobalja. Korištena je puna spektralna formulacija oslonjena na radove Komana i sur. [33], pri čemu je direkcijski valni spektar zavisna varijabla. Za spektralnu diskretizaciju frekvencijske domene korištena je logaritamska skala minimalne frekvencije 0,08 Hz (valni period 12,5 s) do maksimalne frekvencije 0,95 Hz (valni period 1,05 s), kroz 28 diskretnih koraka. Modelskom implementacijom obuhvaćeni su procesi valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije, difrakcije i oplićavanja te disipacijski procesi izazvani trenjem s dnom, površinskim lomovima valova (eng. *white capping*) i lomovima valova pri nailasku na male dubine. Za propagaciju valnog djelovanja upotrebljava se multisekvencijalna Eulerova eksplicitna metoda. Član-funkcija izvora u jednadžbi očuvanja valnog djelovanja

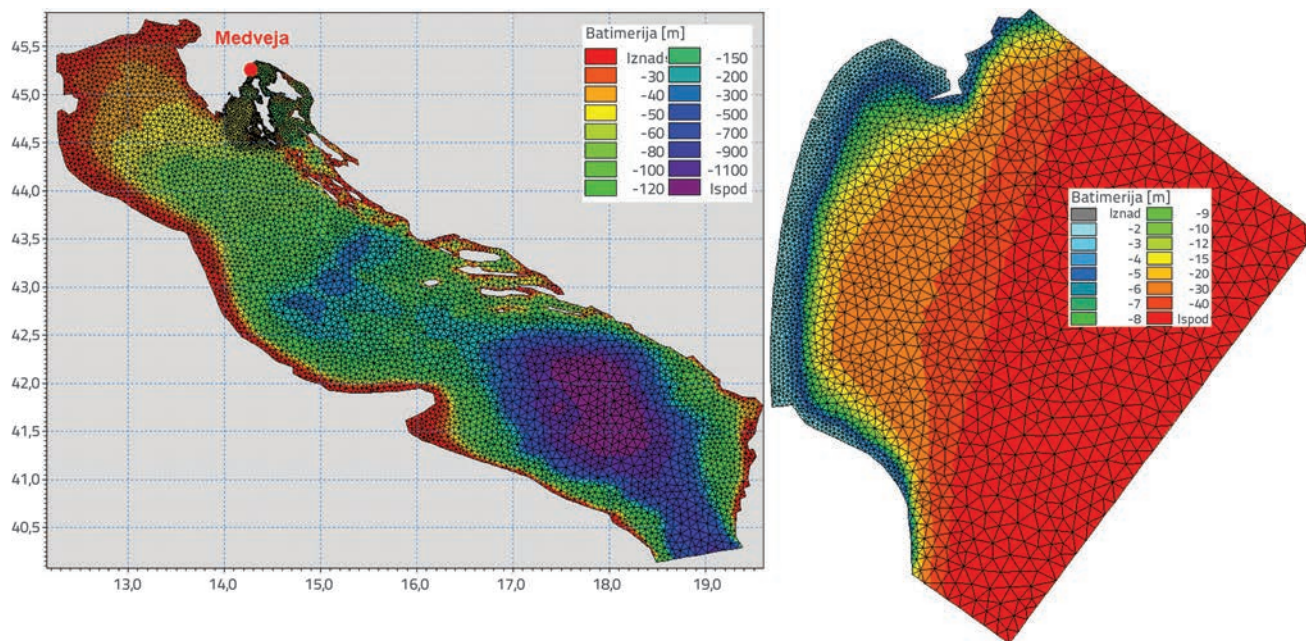


tretirana je na temelju treće generacije u formulaciji opisa tog člana, a numerička integracija za član izvora provedena je prema metodologiji prikazanoj u radovima Hercbacha i Jannsen [34]. Konvektivni fluksevi izračunani su "upwind" numeričkom shemom prvog reda.

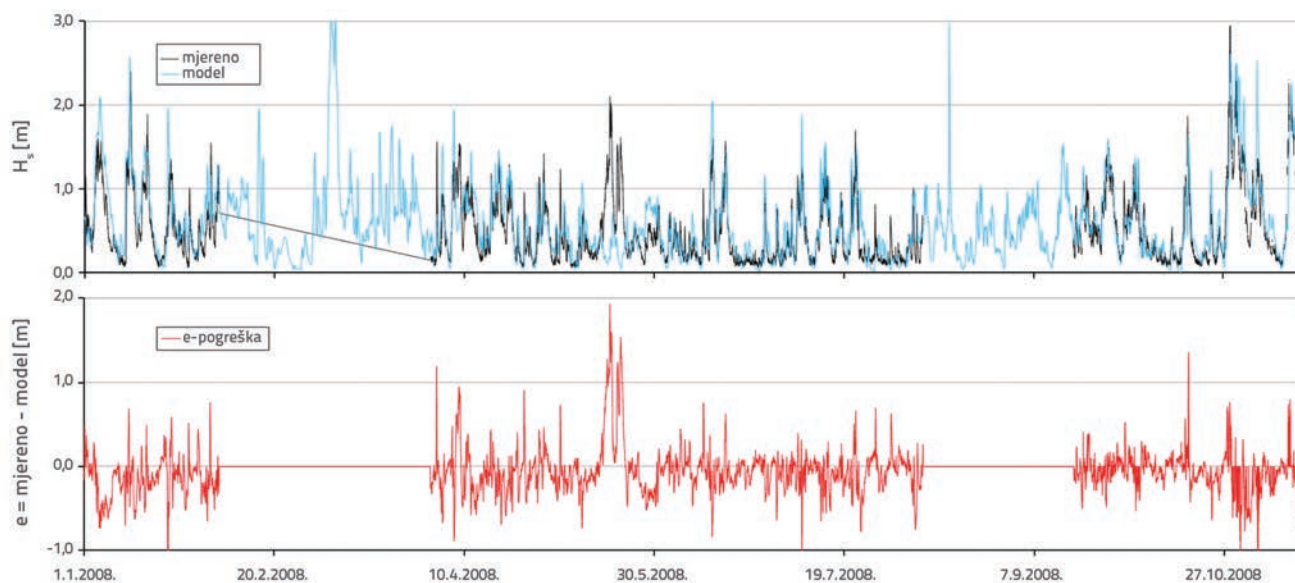
Početni uvjeti simulacija s regionalnim modelom (1. siječnja 2008. i 1. siječnja 2013. 0:00) definirani su nultim valnim spektrom, odnosno bez inicijalnog valnog gibanja na cijelom modeliranom području. Tijekom analiziranih razdoblja (1. siječnja 2008. do 15. studenog 2008. i 1. siječnja 2013. do 1.

siječnja 2014.) regionalni model je forsiran poljem vjeta iz atmosferskog modela Aladin-HR, prostornom rezolucijom od 8 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata [35, 36].

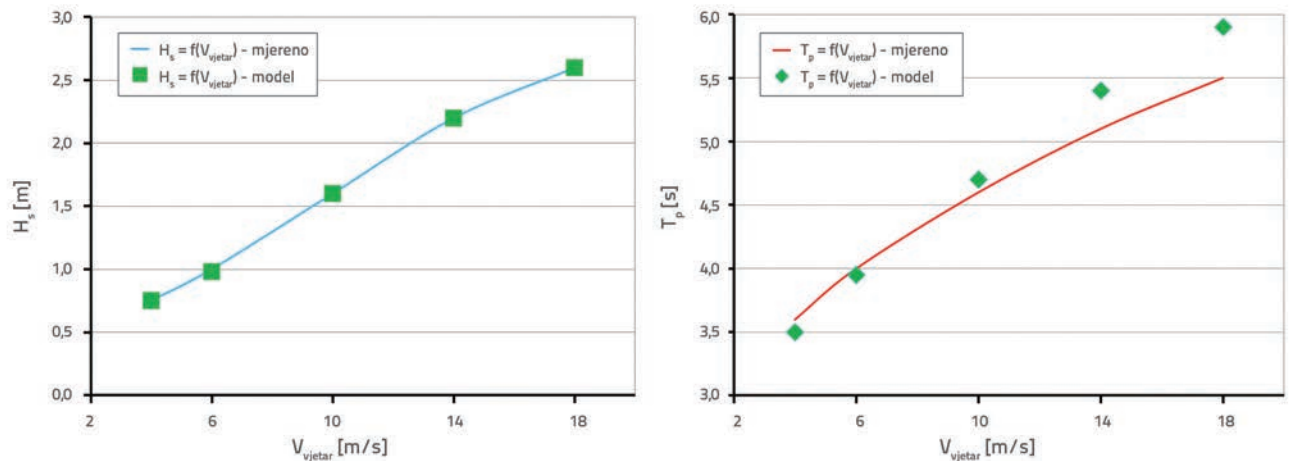
Za baždarenje regionalnog modela korišteno je nekoliko izvora. Prvi izvor su mjerenja valnih karakteristike na valografskoj postaji smještenoj u području otvorenog mora sjevernog Jadrana (platforma Ivana;  $\varphi = 44^{\circ} 44.5'N$ ,  $\lambda = 13^{\circ} 10.2'E$ ). Na slici 8. prikazana je usporedba izmjerene i modelirane dinamike značajnih valnih visina za poziciju valografske postaje tijekom 1. siječnja 2008. do 15. studenog 2008. te histogram pogreške



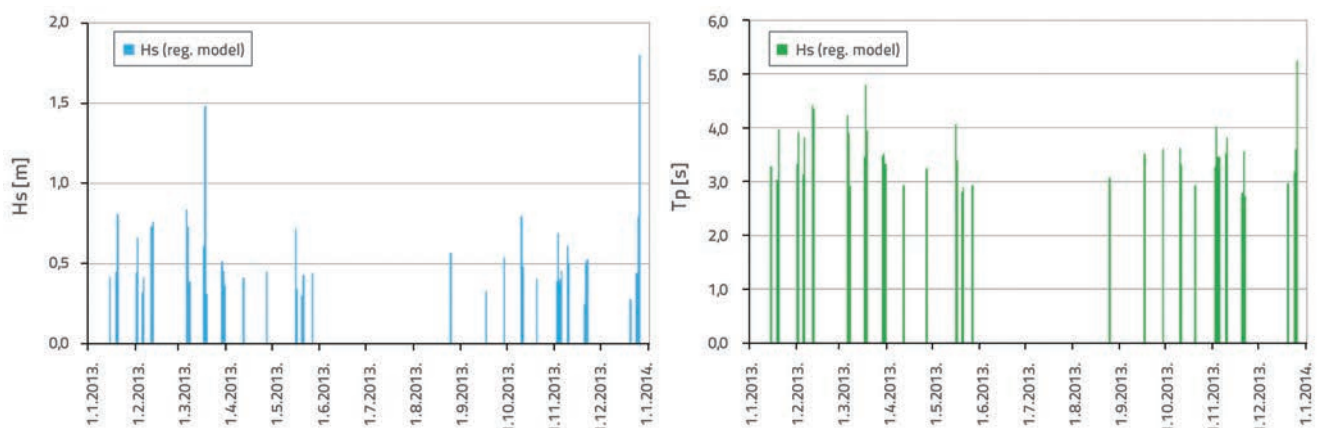
Slika 7. Prostorna diskretizacija modelskih prostornih domena s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena na batimetrijskoj podlozi (lijevo - regionalni model ; desno - lokalni model)



Slika 8. Usporedba izmjerene i modelirane vremenske niza značajnih valnih visina  $H_s$  na poziciji valografske postaje (gore) i histogram pogreške (e = mjerenje - model) modelskih vrijednosti  $H_s$  za provedenu numeričku simulaciju u 2008. godini



Slika 9. Odnos izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina  $H_s$  i vršnih perioda  $T_p$  o izmjerenim brzinama vjetra  $V_{vjetar}$  pri djelovanju vjetra iz SSE smjera s trajanjem 12 sati [37] (pozicija lukobran Petar Drapšin u luci Rijeka)



Slika 10. Termini nastupa valovanja prema usvojenom kriteriju za relevantne situacije ( $H_s \geq 0,2$  m ;  $T_p \geq 2,7$  ; raspon incidentnih smjerova  $112^\circ - 180^\circ$ )

(izmjereni  $H_s$  i modelirani  $H_s$ ) za isto razdoblje. Statistika pogreške modeliranih vrijednosti polusatno osrednjenih značajnih valnih visina na poziciji valografa u odnosu na izmjerene vrijednosti za period simulacije 1. siječnja 2008. do 15. studenog 2008. ima slijedeća obilježja: srednja pogreška  $AE = -0,064$ ; korijen srednjeg kvadratnog odstupanja  $RMSE = 0,0038$ . Drugi izvor predstavljaju podaci mjerenja valova na poziciji lukobrana Petar Drapšin u luci Rijeka (slika 9.). Na slici 9. prikazan je odnos izmjerenih značajnih valnih visina  $H_s$  i vršnih perioda  $T_p$  o izmjerenim brzinama vjetra  $V_{vjetar}$  pri djelovanju vjetra iz SSE smjera s trajanjem 12 sati [37]. Na slici 9. prikazani su i rezultati numeričkih simulacija za istu poziciju pri stacionarnom i homogenom djelovanju vjetra od 4, 6, 10, 14 i 18 m/s.

Na slici 10. prikazani su nastupi valovanja prema prethodno usvojenom kriteriju za relevantne situacije ( $H_s \geq 0,2$  m ;  $T_p \geq 2,7$  ; raspon incidentnih smjerova  $112^\circ - 180^\circ$ ), za dubokovodnu točku ispred uvala Medveja (vidi sliku 5). Prepoznate su ukupno 42 situacije (tablica 3.). Početak pojedine situacije, njezino trajanje, pripadne srednje značajne valne visine i vršne periode

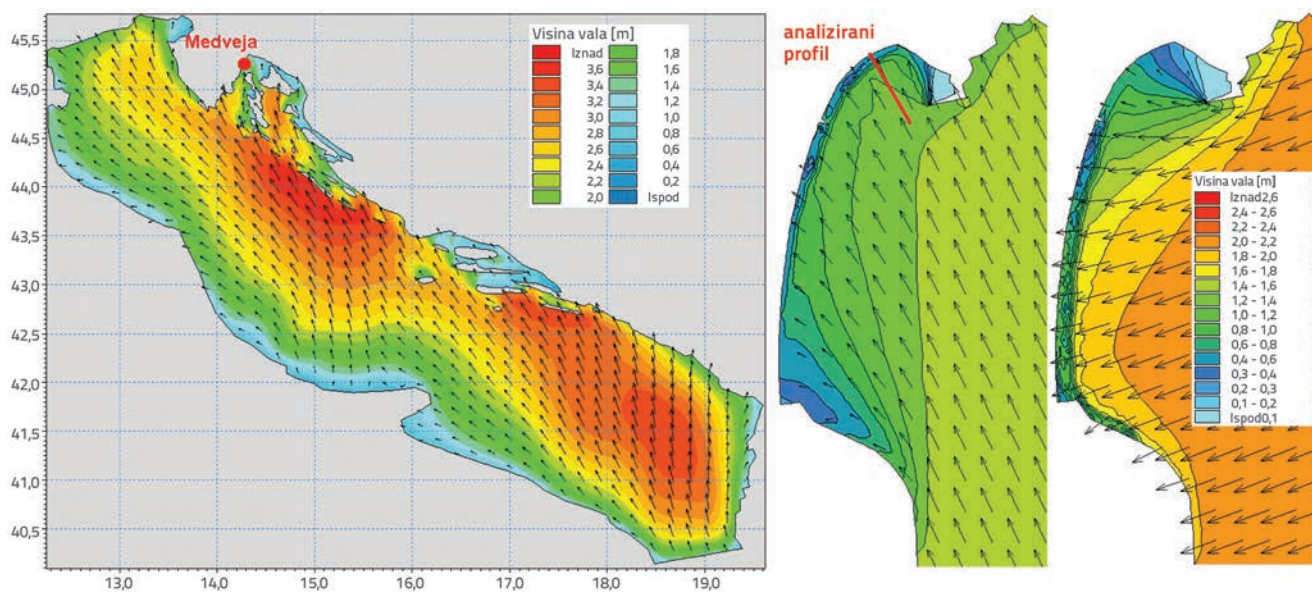
te maksimalne značajne valne visine naznačene su u tablici 3. Potrebno je napomenuti da su se tijekom simulacijskog razdoblja najveći valovi ispred uvala Medveja pojavili 11. studenog 2013. ( $H_{s-MAX} = 2,1$  m) pri djelovanju olujne bure. Budući da analizirani profil nije izložen valovanju iz tog incidentnog smjera, takva situacija nije bitna za morfološki razvoj profila i nije uzeta u obzir. Sa slike 10. i iz podataka u tablici 3. razvidno je da jačeg valovanja iz usvojenog raspona incidentnih smjerova ( $112,5^\circ - 180^\circ$ ) nije bilo od 17. ožujka do 25. prosinca 2013., odnosno da je blaga valna klima prevladavala devet mjeseci prije izrade detaljnog geodetskog premjera dna u uvali Medveja (slika 5). Stoga je dodatno provedena morfološka analiza profila plaže u uvjetima najintenzivnijeg nevremena iz 2013. godine (tablica 3., situacija 42; 25. i 26. prosinca 2013.), nakon njegovog snimka 23. prosinca 2013.

Polja značajnih valnih visina za situaciju jakog juga u terminu 18. ožujka 2013. 13:00 prikazana su na slici 11. (regionalni i lokalni model) kao i polje značajnih valnih visina pri djelovanju olujne bure (11. studeni 2013. 10:00 ; lokalni model). Sa slike



Tablica 3. Početak pojedine situacije, njezino trajanje, pripadne srednje značajne valne visine i vršni periodi te maksimalne značajne valne visine tijekom pojedine situacije za dubokovodnu točku ispred uvala Medveja (rezultati iz regionalnog modela)

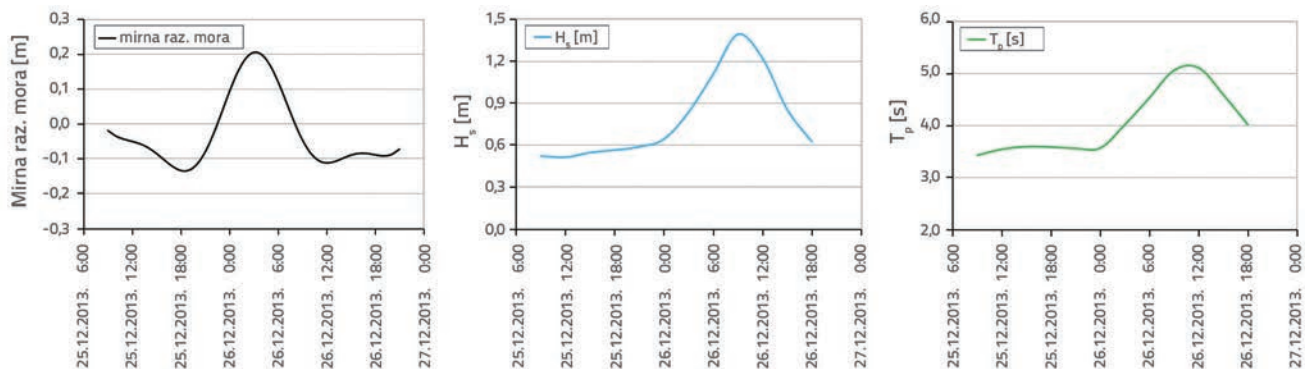
nastup situacije (dd.mm.yyyy., sat)		dubokovodni uvjeti				nastup situacije (dd.mm.yyyy., sat)		dubokovodni uvjeti			
		trajanje [h]	$H_{S-AV}$ [m]	$T_{P-AV}$ [s]	$H_{MAX}$ [m]			trajanje [h]	$H_{S-AV}$ [m]	$T_{P-AV}$ [s]	$H_{MAX}$ [m]
1	15.1.2013., 10:00	12	0,26	3,1	0,32	22	16.5.2013., 2:00	36	0,31	3,4	0,55
2	19.1.2013., 21:40	3	0,33	2,9	0,33	23	17.5.2013., 16:40	3	0,17	3,0	0,17
3	20.1.2013., 2:00	18	0,49	3,6	0,54	24	20.5.2013., 22:00	3	0,21	2,8	0,21
4	24.1.2013., 20:20	3	0,22	3,1	0,22	25	21.5.2013., 13:40	3	0,29	2,8	0,29
5	1.2.2013., 0:00	15	0,45	3,6	0,52	26	23.5.2013., 15:40	3	0,32	2,8	0,32
6	4.2.2013., 15:40	3	0,29	3,1	0,29	27	27.5.2013., 9:20	3	0,33	2,8	0,33
7	5.2.2013., 21:40	3	0,24	3,0	0,24	28	26.6.2013., 13:40	3	0,37	2,8	0,37
8	6.2.2013., 6:00	6	0,27	3,4	0,32	29	25.8.2013., 14:00	3	0,41	3,0	0,41
9	11.2.2013., 16:00	12	0,46	4,0	0,58	30	2.9.2013., 3:40	3	0,29	2,9	0,29
10	19.2.2013., 12:00	3	0,39	3,4	0,39	31	17.9.2013., 4:00	6	0,42	3,2	0,23
11	6.3.2013., 7:00	36	0,47	3,5	0,65	32	29.9.2013., 9:00	9	0,39	3,2	0,40
12	11.3.2013., 4:40	3	0,33	3,0	0,33	33	10.10.2013., 14:00	21	0,42	3,2	0,60
13	17.3.2013., 15:00	39	0,59	3,8	1,14	34	20.10.2013., 15:00	6	0,31	2,9	0,32
14	25.3.2013., 20:00	3	0,30	3,3	0,30	35	2.11.2013., 12:00	42	0,31	3,3	0,54
15	29.3.2013., 6:00	6	0,34	3,3	0,40	36	7.11.2013., 21:40	3	0,28	2,9	0,28
16	30.3.2013., 10:40	3	0,30	3,1	0,30	37	9.11.2013., 7:00	33	0,35	3,3	0,48
17	31.3.2013., 1:00	3	0,30	3,3	0,30	38	17.11.2013., 14:40	3	0,31	2,9	0,31
18	8.4.2013., 9:20	3	0,30	2,9	0,30	39	21.11.2013., 15:00	6	0,38	3,4	0,40
19	12.4.2013., 15:00	3	0,32	2,9	0,32	40	10.12.2013., 23:40	3	0,29	2,8	0,29
20	22.4.2013., 16:40	3	0,33	2,9	0,33	41	20.12.2013., 13:00	3	0,20	2,9	0,20
21	27.4.2013., 19:00	3	0,24	3,0	0,24	42	25.12.2013., 9:00	36	0,78	4,1	1,39



Slika 11. Polja značajnih valnih visina za situaciju puhanja jakog juga (situacija 13. - 18. ožujka 2013., 13:00) dobivena regionalnim (lijevo) i lokalnim (sredina) modelom valnog generiranja i valnih deformacija te polje značajnih valnih visina za situaciju puhanja olujne bure (11. studenoga 2013., 10:00) dobivena lokalnim modelom (desno)

Tablica 4. Amplitude (amp) i faze plimnih konstituenata korištenih u sintezi kretanja morskih razi za lokaciju Bakar [38]

O1		P1		K1		N2		M2		S2		K2	
amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza
[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]
4,41	53,1	5	65,4	14,06	67,4	1,96	252	10,32	250,1	5,75	250,4	1,71	235,4

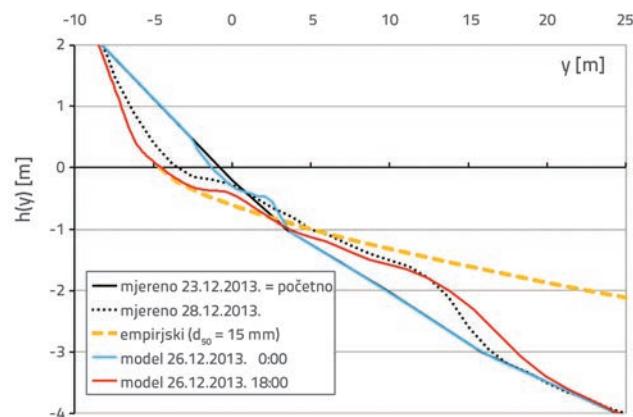
Slika 12. Rubni uvjeti modela XBeach-G (mirna raz mora,  $H_s$ ,  $T_p$ ) definirani s trosatnom rezolucijom

11. može se uočiti da dominantnu ulogu u morfološkom razvoju analiziranog poprečnog profila plaže ima valovanje generirano vjetrovima juga. Time je opravdana i primjena jednodimenzionalnog morfodinamičkog modela (XBeach-G) uzduž trase profila plaže sa slike 5.

Modelski inicijalni profil plaže (23. prosinac 2013.) istovjetan je izmjerenom (slika 5.). U provedbi numeričkih simulacija za  $d_{50}$  usvojena je vrijednost 14,5 mm, prema rezultatima laboratorijske analize granulometrijskog sastava uzorka s pozicije lica plaže (slika 5.). Dinamika morskih razi uzeta je u obzir na temelju 7 osnovnih konstituenata plimnog signala [38] (tablica 4., slika 12.). Potrebno je napomenuti da su rubni uvjeti modela XBeach-G ( $H_s$ ,  $T_p$ , mirna raz mora, slika 12.) definirani s trosatnom rezolucijom.

Na slici 13. prikazani su izmjereni profili plaže 23. prosinca i 28. prosinca 2013., izračunani profili na sredini (26.12.2013. 0:00) i kraju simulacijskog razdoblja (26. prosinac 2013. 18:00), te profil dobiven empirijskim izrazom [10, 11].

Ukupna erodirana površina dobivena provedenim numeričkim morfodinamičkim proračunom iznosi 6,5 m<sup>2</sup> (slika 13.). Primjenom empirijskog izraza (1) i dijagrama erozije sa slike 4., uz usvojene vrijednosti  $H_s = 1,08$  m ;  $T_p = 4,66$  s (srednje vrijednosti za 26. prosinac 2013. 3:00 - 26. prosinac 2013. 15:00, slika 12.);  $d_{50} = 14,5$  mm ;  $\rho_s = 2600$  kg/m<sup>3</sup> ;  $\rho_M = 1028$  kg/m<sup>3</sup> ;  $N = 9734$  ;  $P = 25$  % ;  $\tan\alpha = 0,22$  (od -2 do +2 m) dobivene su vrijednosti erodirane površine od 45,6 m<sup>2</sup> (empirijski izraz (1)) i 6,2 m<sup>2</sup> (primjena dijagrama sa slike 3.). Erodirana površina izmjenjenog profila 28. prosinca 2013. u odnosu na izmjereni profil 23. prosinca ise godine iznosi 4,5 m<sup>2</sup>.



Slika 13. Izmjereni profili plaže 23.12.2013. (inicijalni) i 28.12.2013., modelirani profili na sredini (26.12.2013., 0:00) i kraju (26.12.2013., 18:00) simulacijskog razdoblja (situacija 42 iz tablice 3.) te ravnotežni profil prema empirijskom izrazu u [10, 11]

## 6. Zaključak

Provedena je analiza morfodinamike za šljunčane poprečne profile plaža i podmorja pri djelovanju gravitacijskih vjetrovnih valova. Kako bi se analizama obuhvatio raspon karakterističnih okolišnih uvjeta, variran je inicijalni nagib plaže (od 1:4 do 1:10), strmost dubokovodnih valova (od 1:12 do 1:25) te promjer zrna šljunka (od 10 do 30 mm).

U provedbi istraživanja korišten je numerički model XBeach-G, te empirijski izrazi za proračun forme dinamički stabilnih profila i procjenu erodiranih površina uzduž profila. Na osnovi rezultata numeričkih proračuna dobiveni su dijagrami koji omogućuju jednostavnu procjenu očekivane količine erodiranog materijala plaže u ovisnosti o prevladavajućim valnim uvjetima, inicijalno odabranom nagibu plaže i granulaciji nasipnog materijala. Numeričkim simulacijama valnog generiranja i valnih deformacija na široj prostornoj skali dobiveni su rubni uvjeti za dodatno

provedenu analizu morfodinamike realnog profila šljunčane plaže Medveja. Ti su rezultati omogućili da se praktično primijene dijagrami za procjenu erozije realnog profila plaže u realnim valnim situacijama te da se usporede s rezultatima primjene empirijskih obrazaca. Napominje se da je proračun proveden za umjerenije valove koji su prevladavali tijekom simulacijskog razdoblja, a pri dimenzioniranju šljunčanih plaža najviše je pozornosti usmjereno upravo na mogućnost uništenja plaže ekstremno velikim valovima. Za direktnu primjenu dijagrama erozije korištene su usrednjene vrijednosti značajnih valnih visina i vršnih valnih perioda analizirane ekstremne situacije, a dobivena procjena površine erozije šljunčanog profila ( $6,2 \text{ m}^2$ ) bliska je rezultatu detaljnog

numeričkog proračuna ( $6,5 \text{ m}^2$ ) i rezultatu mjerenja ( $4,5 \text{ m}^2$ ). Primjena empirijskog obrasca za procjenu erodirane površine rezultira višestrukim prekoračenjem izmjerenih i modeliranih vrijednosti, te se ne preporučuje. Dobiveni rezultati pokazali su da predstavljeni dijagrami mogu imati praktičnu primjenu pri donošenju odluka u raznim, a ponajviše u ranijim fazama projektiranja.

Treba naglasiti da se prikazani zaključci o stabilnosti analiziranog poprečnog profila plaže Medveja ne mogu primijeniti globalno (za čitavu plažu). Stoga je za nastavak ovdje započetog istraživanja potrebno predvidjeti proširenje dimenzionalnosti modela, uz usvajanje nehomogenosti u parametrizaciji plažnog materijala.

## LITERATURA

- [1] Austin, M.J., Masselink, G.: Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach, *Marine Geology*, 229 (2006) 1-2, pp. 59-77.
- [2] Carter, R.W.G., Orford, J.D.: The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers: a short term and long term perspective, *J. Coast. Res. Special issue*, 15 (1993), pp. 158-179.
- [3] McKay, P.J., Terich, T.A.: Gravel barrier morphology: Olympic National Park, Washington State, USA, *J. Coast. Res.*, 8 (1992) 4, pp. 813-829.
- [4] Forbes, D.L., Orford, J.D., Carter, R.W.G., Shaw, J., Jennings, S.C.: Morphodynamic evolution, self-organisation and instability of coarse clastic barriers on paraglacial coasts, *Mar. Geol.*, 126 (1995) 1-4, pp. 63-85.
- [5] Ojeda, E., Guillen, J.: Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches, *Mar. Geol.*, 253 (2008) 1-2, pp. 51-62.
- [6] Curtiss, G. M., Osborne, P. D., Horner-Devine, A. R.: Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents, *Mar. Geol.*, 259 (2009) 1-4, pp. 73-85.
- [7] Poate, T., Masselink, G., Davidson, M., McCall, R., Russell, P., Turner, I.: High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions, *Mar. Geol.*, 342 (2013), pp. 1-13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2013.05.009>
- [8] Orford, J.D.: A proposed mechanism for storm beach sedimentation, *Earth Surf. Proc. Land*, 2 (1977) 4, pp. 381-400.
- [9] Almeida, L., Masselink, G., Russell, P., Davidson, M., Poate, T., McCall, R., Blenkinsopp, C., Turner, I.: Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, Proceedings 12th International Coastal Symposium, Plymouth, (2013), pp. 636-641.
- [10] USACE: *Coastal Engineering manual*, Part III, EM 1110-2-1100, 2008.
- [11] Dean, R.G.: *Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions*, Proc. Coastal Sediments, ASCE, New Orleans, pp. 1-24, 1987.
- [12] Van der Meer, J. W.: Stability of breakwater armour layers - design formulae, *Coastal Engineering*, Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam, pp. 234, 1987.
- [13] Bradbury, A.P.: Predicting breaching of shingle barrier beaches - recent advances to aid beach management, *Papers and Proceedings 35th MAFF (DEFRA) Conference of River and Coastal Engineers*, Keele, pp. 05.3.1-05.3.13, 2000.
- [14] Obhrai, C., Powell, K., Bradbury, A.: A laboratory study of overtopping and breaching of shingle barrier beaches, *Proceedings of 31st International Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, pp. 1497-1508, 2008.
- [15] Bradbury, A., Cope, S., Prouty, D.: Predicting the response of shingle barrier beaches under extreme wave and water level conditions in Southern England, *Proc. 5th International Coastal Dynamics Conference*, Barcelona, pp. 1-14, 2005.
- [16] Cope, S.: Predicting overwashing and breaching of coarse - clastic barrier beaches and spits - application to Medmerry, West Sussex, Southern England, *Proc. 5th International Coastal Dynamics Conference*, Barcelona, pp. 1-14, 2005.
- [17] Roelvink, J.A., Reniers, A., van Dongeren, A.R., van Thiel de Vries, J.S.M., McCall, R., Lescinski, J.: Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56 (2009) 11-12, pp. 1133-1152.
- [18] Tuan, T.Q., Verhagen, H.J., Visser, P., Stive, M.J.F.: Numerical modelling of wave overwash on low-crested sand barriers, *30th Coastal Engineering Conference*. World Scientific, San Diego. 2006.
- [19] Jamal, M.H., Simmonds, D., Magar, V.: Modelling gravel beach dynamics with XBeach, *Coast. Eng.*, 89 (2014), pp. 20-29.
- [20] Pedrozo-Acuna, A., Simmonds, D., Otta, A.K., Chadwick, A.J.: On the cross-shore profile change of gravel beaches, *Coast. Eng.*, 53 (2006) 4, pp. 335-347.
- [21] Williams, J., de Alegría-Arzaburu, A.R., McCall, R.T., van Dongeren, A.: Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results, *Coast. Eng.*, 63 (2012), pp. 62-80, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.12.010>
- [22] McCall, R., Masselink, G., Roelvink, J., Russell, P., Davidson, M., Poate, T.: Modeling overwash and infiltration on gravel barriers, *Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering*, Santander, pp. 1-48, 2012.
- [23] McCall, R.T., Masselink, G., Poate, T.G., Roelvink, J.A., Almeida, L.P., Davidson, M., Russell, P.E.: Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G, *Coast. Eng.*, 91 (2014), pp. 231-250, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.06.007>



- [24] McCormack, R.W.: The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering, *AIAA Hyper Velocity Impact Conference*, Cincinnati, pp. 69-354, 1969., <http://dx.doi.org/10.2514/6.1969-354>
- [25] Smit, P., Stelling, G., Roelvink, J., Van Thiel de Vries, J., McCall, R., Van Dongeren, A., Zwinkels, C., Jacobs, R.: XBeach: non-hydrostatic model: validation, verification and model description, Delft University of Technology, 2010.
- [26] Stelling, G.S., Duinmeijer, S.P.A.: A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 43 (2003) 12, pp. 1329-1354, <http://dx.doi.org/10.1002/flid.537>
- [27] Smagorinsky, J.: General circulation experiments with the primitive equations. *Mon. Weather Rev.*, 91 (1963) 3, pp. 99-164, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- [28] Stelling, G.S., Zijlema, M.: An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 43 (2003), pp. 1-23, <http://dx.doi.org/10.1002/flid.595>
- [29] Halford, K.: Simulation and interpretation of borehole flowmeter results under laminar and turbulent flow conditions. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Logging for Minerals and Geotechnical Applications*, Golden, Colorado. The Minerals and Geotechnical Logging Society, pp. 157-168, 2000.
- [30] Packwood, A.: The influence of beach porosity on wave uprush and backwash. *Coast. Eng.*, 7 (1983) 1, pp. 29-40, [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839\(83\)90025-X](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3839(83)90025-X)
- [31] Goda, Y.: *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced series on ocean engineering, World Scientific Ed., New Jersey, 2000.
- [32] Horn, D.P.: Beach groundwater dynamics, *Geomorphology*, 48 (2002), pp. 121-146, [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00178-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00178-2)
- [33] Komen, G., J., Cavaleri, M., Donelan, K., Hasselman, S., Hasselman, K., Janssen, P.A.E.M.: *Modelling of dynamic of ocean surface waves*, Cambridge university press, Cambridge, pp. 532, 1994.
- [34] Herzbach, H., Janssen, P.A.E.: *Improvement of the short-fetch behaviour in the Wave Ocean Model (WAM)*, *J. Atmos and Ocean Tech.*, 16 (1999), pp. 884-892, [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0884:IOTSF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0884:IOTSF>2.0.CO;2)
- [35] Građevinski institut: "Hidraulička analiza valova i nasipnih konstrukcija sjeverne obale brodogradilišta 3. Maj u Rijeci", Građevinski institut, 1991.
- [36] Brzović, N., Strelec-Mahović, N.: *Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic*, *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 24 (1999), pp. 653-657, [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00061-1)
- [37] Ivatek-Sahdan, S., Tudor, M.: *Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies*, *Meteorol. Z.*, 13 (2004), pp. 99-108, <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2004/0013-0099>
- [38] Janeković, I., Kuzmić, M.: Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.*, 23 (2005), pp. 3207-3218.